

Energia nucleare: passato o futuro?

Bilancio dell'Utente elettrico e mix energetico plausibile
Domenico Salimbeni

In Italia il problema dell'utilizzazione dell'energia nucleare ha ormai perso completamente i suoi naturali connotati tecnici per migrare nel campo eminentemente politico. Si tratta evidentemente di un grosso errore che noi italiani rischiamo di dover pagare in modo molto salato, in quanto non si può ragionare su aspetti tecnici con incontrollate reazioni emotive.

D'altra parte è comprensibile che la popolazione, conscia di non poter adeguatamente seguire un discorso scientifico, tema anche di essere circuita, e venga quindi assalita dalla sindrome di San Tommaso e si rifiuti di recepire considerazioni tecniche che non possano esserle dimostrate in modo inequivocabile e facilmente accessibile. È chiaro che una dimostrazione di tal genere, già di per sé difficile, diventa impossibile se coloro che dovrebbero riceverla si rifiutano, anche inconsciamente, di assumere parte attiva nella comunicazione e si chiudono "a riccio" nel timore di essere convinti.

Ho quindi ritenuto necessario uscire da questo circolo vizioso e cercare di ragionare su argomenti che tutti noi periodicamente "tocchiamo con mano" (sarebbe più corretto scrivere "con la tasca"), quindi conosciamo molto bene.

Mi è apparso che anche il perseguire questa strada avrebbe potuto essere soggetto alla contestazione dei dati utilizzati. Per questo motivo ho quindi ritenuto necessario assumere nel ragionamento, ed elaborare, come suggerisco sempre agli allievi del corso "Controllo dei Processi in Regime di Qualità", esclusivamente dati certi, cioè dati rilevabili in documenti ufficiali. I dati utilizzati nel seguito sono stati tratti dunque dai seguenti Enti:

- ➡ IAEA (International Atomic Energy Agency) www.iaea.org
- ➡ ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile) www.enea.it
- ➡ GSE (Gestore Servizi Energetici) www.gse.it
- ➡ GRTN (Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale) www.grtn.it
- ➡ TERNA (Principale proprietario della Rete di Trasmissione Nazionale) www.terna.it
- ➡ ISPESL (Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul Lavoro) oggi INAIL www.ispesl.it
- ➡ AEEG (Autorità per l'energia elettrica e il gas) www.autorita.energia.it

raggiungibili agli indirizzi internet indicati.

A questo punto resta solo da individuare l'argomento che tutti noi conosciamo meglio in materia energetica: io credo che la bolletta elettrica sia l'argomento ideale. Comincio quindi proprio da questo documento che periodicamente giriamo e rigiriamo fra le nostre mani nel vano tentativo di capire da dove siano scaturite le cifre esposte.

Al fine di poter determinare cifre univoche ho simulato la bolletta di un Utente tipo, cioè una famiglia media che occupa un appartamento di 120÷140 m² servito da una pompa di calore. L'impegno di potenza è di 6,0 kW, e l'energia assorbita annualmente è stata stimata in 3500 kWh. Queste scelte derivano dall'articolazione del regime tariffario italiano che prevede condizioni di favore per le utenze fino a 3 kW di potenza impegnata e consumi contenuti, e anche per Utenti disagiati con potenza maggiore, e le fa compensare agli altri. Per semplicità ho fatto il calcolo su base annua.

L'importo complessivo in bolletta è articolato sulle sei voci seguenti:

➡ quota fissa, che si deve corrispondere al fornitore di energia elettrica a compensazione degli oneri contabili	22,50720	€
➡ quota potenza, proporzionale alla potenza impegnata, che deve essere garantita dal fornitore dell'energia elettrica il quale impegna a tal fine una quota parte dell'intero sistema	86,61240	€
➡ quota energia, proporzionale all'energia assorbita	505,62225	€
➡ quota perdite di rete, che tiene conto del rendimento di trasmissione	54,60720	€
➡ imposta erariale	96,45320	€
➡ IVA	76,58023	€
➡ Importo complessivo	842,38	€

La composizione della quota energia non è molto semplice, per giunta varia su delibera dell'Autorità

per l'energia elettrica e il gas che ne fissa periodicamente il valore assoluto e l'incidenza percentuale delle singole voci.

Alla fine dello scorso anno la quota energia è risultata articolata nel seguente modo:

➡ costo dell'energia	269,1500	€
➡ costo della rete e del sistema di misura	135,1473	€
➡ componente MTC, che compensa i disagi provocati a suo tempo alle popolazioni che hanno accolto le centrali nucleari	0,5950	€
➡ componente A2, che compensa i danni subiti dall'Enel a seguito del referendum del 1987 per lo smantellamento e/o la riconversione delle centrali nucleari legittimamente realizzate in precedenza	10,9950	€
➡ componente A3, che copre i finanziamenti erogati dallo Stato per favorire la diffusione e lo sviluppo di sistemi di sfruttamento di energie rinnovabili	76,3350	€
➡ componente A4, che compensa i prezzi di favore praticati alle aziende energivore allo scopo di evitarne l'allontanamento dall'Italia a causa dei maggiori oneri di approvvigionamento di energia elettrica rispetto alle nazioni confinanti	3,7800	€
➡ componente A5, che finanzia i costi di ricerca del sistema energetico in genere	1,5400	€
➡ componenti UC1+UC3, che compensano gli oneri derivanti dal finanziamento del mercato vincolato	3,6050	€
➡ componente UC4, che compensa i finanziamenti alle imprese minori che producono energia elettrica	2,0300	€
➡ componente UC6, che compensa la ricerca mirata alla miglior efficienza del sistema energetico	0,4200	€
➡ componente As, che compensa i costi di favore per gli utenti disagiati	2,0650	€
➡ quota energia	<u>505,6223</u>	€

Va rilevato innanzitutto come il costo reale dell'energia che noi consumiamo, che peraltro dipende rigidamente dal "mix energetico" utilizzato per la produzione dell'energia elettrica, sia poco più della metà e cioè 53,2% (269,1500/505,6223) del costo che a noi viene addebitato nella bolletta elettrica.

Per il momento, però, concentriamo la nostra attenzione sulle tre componenti MTC, A2 e A3 che dipendono direttamente dalla scelta referendaria del 1987. Queste tre componenti valgono 87,885 €/anno con i costi deliberati dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas nel quarto trimestre dell'anno 2010.

Se l'esito del referendum del 1987 fosse stato differente il nostro Utente tipo avrebbe risparmiato nell'anno 2010 l'importo di 87,885 € sulla quota energia e di 111,635 € sull'intera bolletta, corrispondente al 13,3%.

Un risparmio analogo il nostro Utente tipo avrebbe ottenuto dall'anno 1988 all'anno 2009, anche se differente in ciascun anno sia per il differente valore della moneta sia per la differente articolazione della tariffa (all'interno della quale peraltro la componente A2 ha registrato una progressiva riduzione della propria incidenza, mentre la componente A3 ha registrato un progressivo incremento dell'incidenza dall'anno 1991). Questo risparmio ha un valore attuale di 21828,00 €. In altre parole, se il nostro Utente tipo avesse depositato annualmente in banca il risparmio derivante dall'eliminazione dalla bolletta delle tre voci citate avrebbe oggi nel conto corrente 21828,00 € in più.

Fissato questo punto possiamo concentrarci sul costo reale dell'energia elettrica che, in Italia come negli altri paesi, è determinato dal "mix energetico" utilizzato. Fra poche righe vedremo qual è risultato il "mix energetico" italiano nell'anno 2009 (ultimo i cui dati risultano stabilizzati), ma possiamo ragionare sul costo dell'energia al netto delle imposte, che dipende dai differenti "mix energetici" come da età ed efficienza delle centrali elettriche, tassi di utilizzazione, etc., nelle 16 maggiori nazioni europee evidenziate a lato.

A noi interessano in modo particolare due nazioni:

- ⇒ la Francia, paese più nuclearizzato al mondo con 58 reattori nucleari che coprono quasi l'80% del fabbisogno nazionale;
- ⇒ l'Italia, paese che non utilizza energia nucleare.

anno 2010	costo senza imposte
Austria	9,5
Belgio	11,0
Danimarca	9,6
Finlandia	7,8
Francia	9,1
Germania	13,5
Grecia	6,4
Irlanda	12,0
Italia	15,1
Lussemburgo	13,1
Norvegia	11,8
Paesi Bassi	11,1
Portogallo	13,1
Regno Unito	8,8
Spagna	9,0
Svezia	8,1
MEDIA	10,6

Appare evidente dal diagramma a lato come l'energia elettrica costi in Francia 9,1 c€/kWh e in Italia 15,1 c€/kWh, con un differenziale di ben 6,0 c€/kWh: in Italia l'energia elettrica costa circa il 166% di quanto costa in Francia!

.Qual'è l'origine di questa differenza fra due paesi con regime di vita equivalente? L'unica differenza evidente è proprio la disponibilità di energia nucleare in Francia contrapposta alla mancanza di energia nucleare in Italia che ci costa ben 6,0 c€/kWh!

Se noi avessimo potuto produrre energia elettrica da energia nucleare come in Francia (che a mio parere peraltro utilizza in modo eccessivo l'energia nucleare), il nostro Utente tipo avrebbe risparmiato nell'anno 2010 altri 304,38 €, corrispondente al 36,1% del costo lordo, ma soprattutto il valore attuale di questo risparmio sarebbe stato di 75.564,00 € che, sommati ai 21.828,00 € calcolati prima, determinano un valore attuale complessivo delle conseguenze discendenti dall'esito del referendum del 1987 di 97.392,00 €, che il nostro Utente avrebbe avuto in più nel conto corrente!

Chiarito questo aspetto, di diretta e rilevante incidenza dannosa sull'economia degli Utenti, vorrei affrontare il problema del "mix energetico" ottimale in Italia, che certamente è più affine alla nostra mentalità.

Le fonti energetiche, com'è facilmente intuibile, non sono intercambiabili, in quanto ciascuna gode di caratteristiche peculiari rispetto alle altre, oltre che di vantaggi e svantaggi.

In particolare mi preme in questa sede far rilevare come la richiesta di energia a livello nazionale risulti molto variabile nell'arco dell'anno, ma anche nell'arco di una singola giornata come evidenzia il diagramma Terna in figura 1 nel quale si rilevano il fabbisogno istantaneo programmato (curva celeste) e il fabbisogno istantaneo registrato (curva rossa).



Figura 1

La correttezza di funzionamento del sistema elettrico nazionale nel suo complesso postula ovviamente la minimizzazione dello scostamento tra la potenza programmata e quella effettivamente richiesta. Le centrali elettriche nel loro insieme devono quindi seguire le variazioni del carico, in quanto oggi l'energia elettrica non è immagazzinabile, e la flessibilità d'impiego di ciascuna di esse è strettamente correlata alla sua rapidità di avviamento e di adattamento alle variazioni di carico.

Una centrale termoelettrica a ciclo combinato con turbina a gas è in grado di avviarsi in un tempo di 6÷8 h, con un gradiente di carico di 3÷5 MW/min, mentre una centrale termoelettrica convenzionale a vapore e una centrale idroelettrica sono rispettivamente più lenta e molto più veloce, quindi meno e più adatte a seguire le variazioni di carico, soprattutto quelle imprevedibili rappresentate dallo scarto fra le curve celeste e rossa del diagramma di carico di Terna in figura 1.

In quest'ottica le centrali elettriche possono essere classificate, come nello schema in figura 2, in:

- ➡ controllabili, se si adattano a variazioni di carico rapide;
- ➡ programmabili, se non si adattano a variazioni di carico rapide ma possono coprire variazioni di carico prevedibili;
- ➡ aleatorie se sono inadatte a coprire variazioni di carico.

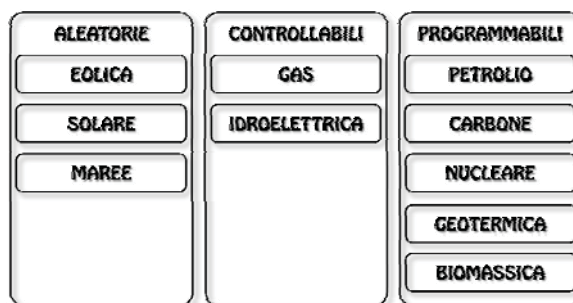


Figura 2

Ecco allora che le differenti centrali elettriche possono essere confrontate e interscambiate solo all'interno di ciascuna classe. In altre parole, per esempio: non si può sostituire una centrale termoelettrica tradizionale o una centrale nucleare (programmabili) con una centrale fotovoltaica (aleatoria), in quanto le due famiglie di centrali svolgono funzioni totalmente differenti nella copertura del carico elettrico.

D'altra parte, non si può sostituire una centrale che produce energia elettrica a basso costo specifico con una centrale che produce energia elettrica a costo specifico elevato, in quanto ne risentirebbe in modo determinante il costo medio dell'energia elettrica al netto delle imposte, quindi a maggior ragione quello fini-

to.

Ne segue l'esigenza di scegliere in via prioritaria centrali in grado di produrre energia elettrica a basso costo, ma senza dimenticare che occorre disporre di centrali in grado di adattarsi velocemente alle variazioni di carico non previste.

Vediamo allora come possiamo coprire il fabbisogno energetico nelle differenti giornate dell'anno, tenendo in considerazione il fatto che questo è compreso sempre fra un carico minimo e un carico massimo, ma può capitare che in determinate situazioni contingenti si registri un fabbisogno anomalo che comunque è contenuto statisticamente in un carico di punta. Nel diagramma in figura 3, tracciato nel piano ora del giorno-potenza in GW, sono evidenziate le tre curve registrate in Italia nell'anno 2009 rispettivamente con linea continua blu e arancione e con linea tratteggiata rossa.

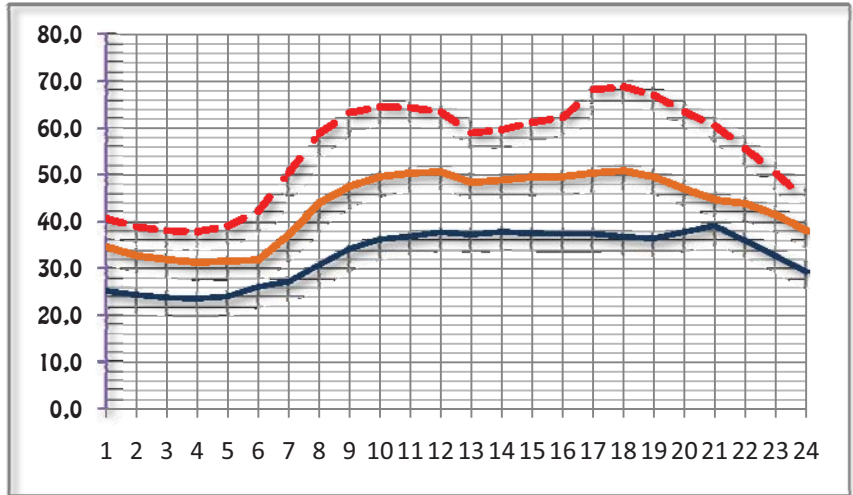


Figura 3

Ebbene, se non siamo in grado di accumulare l'energia elettrica, come accade oggi, in nessuna occasione la produzione dell'insieme delle fonti energetiche aleatorie può sovrastare il fabbisogno energetico minimo.

In altre parole, l'energia solare non può fornire più energia elettrica di quella evidenziata in verde chiaro nella figura 4. Ne segue che la potenza elettrica massima di origine fotovoltaica deve essere contenuta in 36,8 GWp (meno l'energia elettrica di origine eolica evidenziata nella medesima figura con la curva marrone che appare costante) anche se nella realtà potrà fornire, a causa della variabilità delle condizioni meteorologiche, solo l'energia evidenziata in verde più scuro.

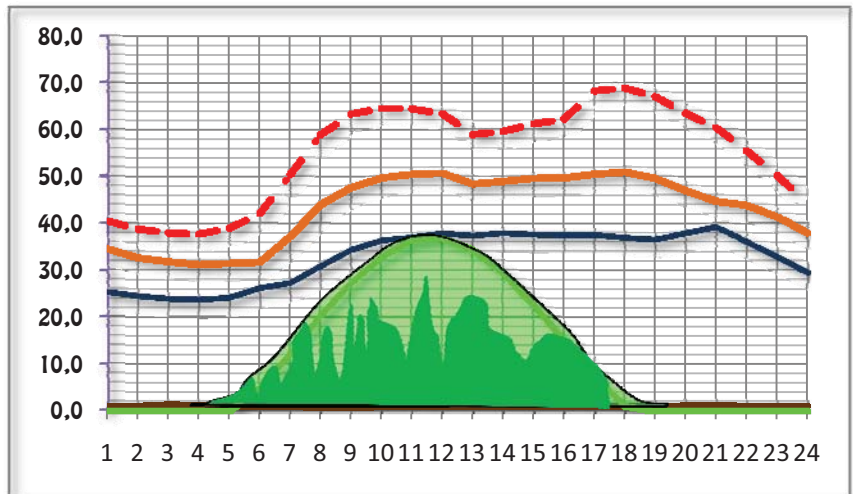


Figura 4

E l'energia mancante? Siccome in teoria l'energia solare potrebbe fornire la produzione di energia elettrica massima possibile si deve fare in modo di poter disporre di centrali elettriche che siano in grado di erogare l'energia elettrica evidenziata in rosso nella figura 5, che vale 11020 GWh/d variabili fra zero e 39 GW in meno di 10 h.

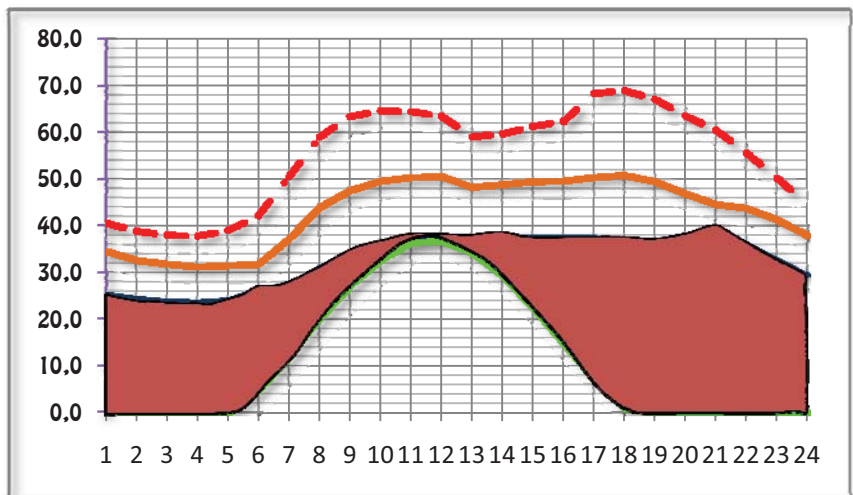


Figura 5

In Italia, come vedremo in seguito, disponiamo a questo fine

di 98,5 GW, dei quali solo 21,6 GW idroelettrici, quindi controllabili, che però non sono in grado di coprire un fabbisogno energetico con l'andamento evidenziato.

Ne segue che il sistema elettrico italiano non è gestibile con 36,8 GWp di energia di origine fotovoltaica.

Il sistema elettrico italiano potrebbe invece essere gestito nella conformazione evidenziata nel diagramma in figura 6, articolata nel seguente modo:

- Energia di origine eolica, con potenza attuale di 3,36 GW (curva verde) che potrebbe anche crescere, in teoria, sino a circa 22 GW, ma a mio parere non oltre una decina di GW;
- Energia di origine solare (area in verde chiaro) sino a un massimo di 13,7 GW (a fronte dei 22 GW appena programmati dal Governo che sono insopportabili dal sistema energetico italiano);
- Energia di tipo controllabile, tipicamente idroelettrica (area azzurra), sino alla potenza di 27,3 GW a fronte dei 21,6 GW attualmente disponibili;
- Energia di tipo programmabile, cioè termoelettrica (petrolio, carbone, gas) o nucleare, o geotermica, o da biomasse, sino a 22 GW meno la potenza di origine eolica (area verde oliva chiaro) e la potenza controllabile, più circa 12 GW per la copertura del carico massimo (area celeste) e altri 18 GW per la copertura del carico di punta, quindi circa 30 GW più la potenza di riserva che compensi fermi per guasti e/o manutenzioni di tutte le centrali programmabili, controllabili e aleatorie.

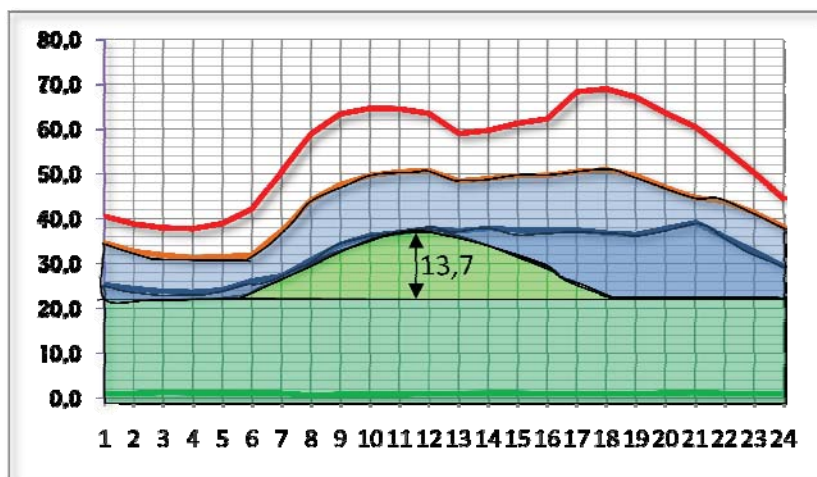


Figura 6

Resta da decidere quale sia il "mix energetico" ideale delle centrali programmabili, che deve essere determinato esclusivamente in funzione del costo unitario di produzione.

A questo punto, però, appare opportuno, prima di procedere, richiamare la situazione attuale in Italia, illustrata nella seguente matrice.

	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>Efficienza</i>	<i>Coeffic.</i>	<i>30 GW</i>
	<i>GW</i>	<i>TWh/a</i>	10^3	<i>potenza</i>	<i>TWh/a</i>
<i>Termoelettrico</i>	76,00	261,30	3,44	2,11	103,14
<i>Idroelettrico</i>	21,60	47,20	2,19	3,32	65,56
<i>Geotermico</i>	0,84	5,52	6,59	1,10	197,85
<i>Eolico</i>	3,36	4,86	1,45	5,01	43,39
<i>Fotovoltaico</i>	0,43	0,19	0,44	16,39	13,26
<i>Totale</i>	102,23	319,07	3,12		
<i>Nucleare</i>	375,10	2717,30	7,24	1,00	217,33

nella quale è opportuno chiarire come la produttività di ciascuna tipologia di centrale registrata in Italia nell'anno 2009 non sia una caratteristica intrinseca della medesima tipologia ma derivi da una scelta di politica operativa del gestore unico della rete elettrica. Appare infatti necessario far rilevare come le centrali a energia rinnovabile godano di una sorta di precedenza di fornitura dalla quale discende una corrispondenza esatta fra la producibilità e la potenza installata, il cui rapporto è evidenziato nella terza colonna come efficienza, mentre le centrali controllabili, e in particolare quelle idroelettriche, sono utilizzate come "tappabuchi" proprio grazie alla loro irrinunciabile controllabilità, quindi sono mantenute in riserva quando non occorre utilizzarle, anche se sarebbero in grado di produrre energia. L'efficienza di queste centrali indicata nella matrice che precede risulta dunque molto sottostimata come, anche se in misura minore, l'efficienza delle centrali termoelettriche.

Anche i dati relativi all'energia nucleare riportati nella matrice che precede risultano sottostimati, in

quanto la mancanza di energia nucleare in Italia mi ha costretto ad utilizzare i dati medi mondiali, cui concorrono centrali molto anziane, anche oltre i 45 anni di vita, e centrali realizzate e gestite in paesi meno avanzati (Europa dell'Est, Sud America, Africa, Asia del Sud) nei quali l'efficienza è molto minore di quella registrata in Giappone, nell'America del Nord e nell'UE.

Nella quarta colonna della matrice si rileva come l'energia prodotta da una centrale nucleare di potenza unitaria richieda una potenza idroelettrica tre volte maggiore (in realtà poco più di due volte maggiore, come quella termoelettrica), una potenza eolica cinque volte maggiore, e una potenza fotovoltaica oltre 16 volte maggiore.

L'ultima colonna evidenzia come i 30 GW di potenza che si pensa di realizzare in Italia prima dei prossimi due lustri potrebbero produrre circa 217 TWh/anno con centrali nucleari, circa 100 TWh/anno con centrali termoelettriche, e solo poco più di 13 TWh/anno con centrali fotovoltaiche.

È interessante anche determinare i costi dell'energia prodotta con differenti tipologie di centrali elettriche nella taglia oggi normale di 1,6 GW (o più centrali della medesima potenza globale) in funzione dei costi di realizzazione, dell'efficienza, della disponibilità, quindi della producibilità reale. Questi dati sono riassunti nella seguente matrice, che nell'ultima colonna evidenzia il coefficiente di costo delle differenti soluzioni. Nella matrice ho adottato, per le centrali nucleari, il maggiore fra i costi reperibili negli studi analitici di settore^{1,2}: IAEA ed ENEA riportano un costo compreso nel campo 2500÷3000 €/kW. Adottando l'estremo superiore di questa fascia di costi la matrice che precede assume la seguente forma:

	Costo unitario	Costo 1,6 GW	Efficienza	Dispon.	Dispon. Σ	Vita	Produc.	Costo norm.	Coeff. Costo
	€/kW	M€	TWh/GW	%	h/a	a	PWh	M€/PWh	
Nucleare	3000,00	4800,00	7,24	90,0	7884	45	568	8,46	1,0
Eolico	1100,00	1760,00	1,45	10,3	902	25	36	48,77	5,8
Eolico off-shore	2100,00	3360,00	1,82	13,0	1139	25	46	73,76	8,7
Fotovoltaico	2900,00	4640,00	0,44	3,2	276	25	11	420,38	49,7
Solare termodinamico	3750,00	6000,00	2,33	16,6	1454	30	70	85,96	10,2

Rispetto al costo di produzione con energia nucleare, l'unità di energia prodotta con centrali eoliche costa 5÷10 volte, l'unità di energia prodotta con centrali solari termodinamiche costa circa 10 volte, l'unità di energia prodotta con centrali fotovoltaiche costa 50 volte! Non dispongo dei dati del solare termico normale, che ha la medesima disponibilità del solare fotovoltaico ma costo minore del 40%, efficienza maggiore del 25% e, soprattutto, la disponibilità di accumulo termico a bassa temperatura che incrementa l'assorbimento energetico di almeno il 70%, per cui l'unità di energia prodotta dovrebbe costare circa 25 volte il costo di quella prodotta con energia nucleare.

I dati di costo appena esposti, unitamente alla considerazione che l'energia solare può coprire solo il 4,4% del fabbisogno energetico col 13% della potenza installata, e che l'energia eolica può coprire solo il 4,5% del fabbisogno energetico col 10% della potenza installata, mostrano come l'affermazione, già di per sé semplicistica, che vento e sole siano in grado di risolvere il problema dell'energia elettrica in Italia sia tecnicamente inaccettabile.

Non mi sono dimenticato, come forse qualcuno ha pensato, che sono rinnovabili anche l'energia geotermica, l'energia producibile con le biomasse, e sicuramente anche l'energia assorbita dal fluido primario nel ciclo a pompa di calore, ma non posso non notare come i l'ONU, la UE, e i Governi di tutto il mondo stiano puntando la loro attenzione solo sulle energie eolica e solare fotovoltaica, e stiano promuovendo praticamente il finanziamento di queste due sole tipologie di energie rinnovabili.

E l'energia nucleare? Che legami ci sono fra l'energia nucleare e il discorso appena fatto?

Spero di aver chiarito che oggi, e molto probabilmente almeno per i prossimi cinquant'anni, le energie rinnovabili non sono in grado di coprire il fabbisogno energetico italiano, nonostante quanto spesso si sente affermare in modo infondato. In una recente trasmissione televisiva sarda qualcuno, confondendo l'energia con la potenza, ha sostenuto che sono sufficienti 64 km² di moduli fotovoltaici, un piccolo quadratino di terri-

¹ Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition, NEA Nuclear Energy Agency, IEA International Energy Agency..

² Un focus sulle centrali nucleari. Costi e tempi di produzione e smaltimento delle scorie.(<http://titano.sede.enea.it/Stampa/skin2col.php?page=eneaperdettagliofigli&id=127>).

torio sardo, per coprire completamente il fabbisogno energetico della Sardegna. La persona che parlava, che pure era un docente universitario, non ha tenuto conto del fatto che quella superficie corrisponde ad almeno 8,8 GWp, cioè quasi il triplo della potenza attualmente installata. E ancora meno ha tenuto in conto che una tale potenza da un lato (durante le ore di massima insolazione) non è sopportabile dalla nostra rete, dall'altro, circostanza banale, è del tutto inesistente la notte, quando noi voltiamo le spalle al Sole, che si offende e non ci fornisce energia.

Spero anche di aver chiarito come le energie da fonti rinnovabili siano non solo "non gratuite", ma nemmeno più economiche di quelle prodotte da fonti fossili o nucleare. Le energie rinnovabili, inoltre, sono acquistate dal gestore unico a un prezzo triplo rispetto al prezzo di mercato dell'energia elettrica. Oggi che l'energia fotovoltaica ha un'incidenza sull'energia prodotta dello 0,06% il costo in bolletta del suo finanziamento è trascurabile, ma se sostituisse completamente tutte le altre fonti di energia elettrica la bolletta ci costerebbe il triplo! È questo l'interesse di noi utenti elettrici italiani?

Spero anche di aver chiarito come le energie rinnovabili, aleatorie, non possano essere messe in competizione con le forme energetiche utilizzate nelle centrali elettriche programmabili, che svolgono un compito non affidabile alle energie rinnovabili.

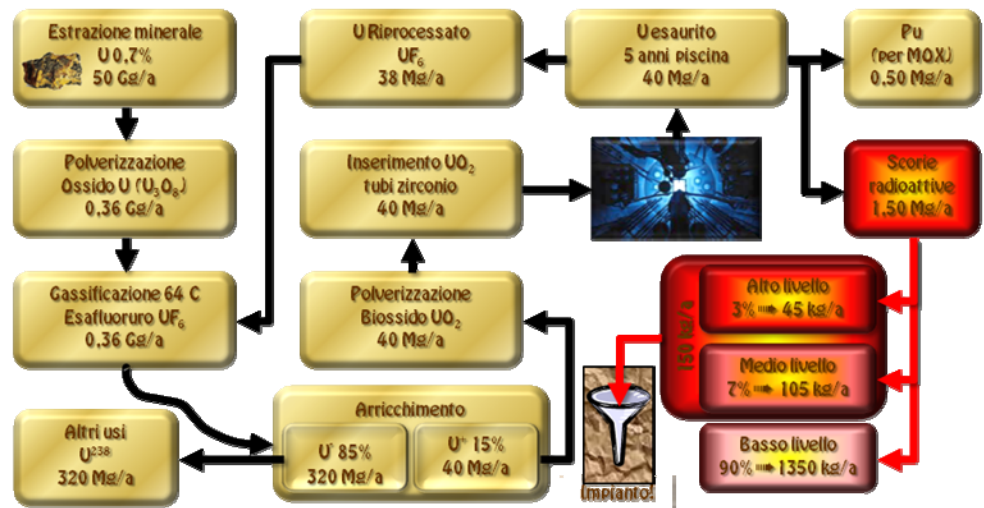
Ma resta ancora un problema da risolvere: come ho già anticipato, non appartengono alla categoria delle centrali programmabili solo le centrali nucleari. E allora per quale motivo dovrebbero preferire le centrali nucleari alle altre centrali programmabili, ad energia fossile (petrolio, carbone, gas) o ad energia rinnovabile (geotermica o biomassa)? Io credo che per ottenere la risposta sia sufficiente riguardare, anche velocemente, la prima matrice analizzata sopra.

E le scorie? Quell'immensa quantità di scorie radioattive che le centrali nucleari producono e dovremo conservare e rendere non nocive per millenni?

Forse è questo l'aspetto che più preoccupa gli italiani. Ebbene, ho analizzato il ciclo del combustibile nucleare al fine di determinare la massa di scorie radioattive prodotte da una centrale nucleare da 1,6 GW, che può produrre il 3,6% del fabbisogno energetico italiano.

Il ciclo del combustibile è descritto nel diagramma di flusso a lato di cui riassumo qui di seguito i passaggi salienti:

- 1) Una centrale nucleare da 1,6 GW contiene circa 240 barre da 0,5 Mg di uranio arricchito al 3÷3,5% di cui ne consuma un terzo all'anno, corrispondente a 40 Mg;
- 2) Per produrre 40 Mg di uranio arricchito occorrono 360¹ Mg di ossido di uranio U₃O₈;
- 3) Per ottenere 360 Mg di ossido di uranio occorrono circa 50 Gg di uranio minerale, che contiene circa lo 0,4÷0,7% di U²³⁵, l'isotopo più efficiente dal nostro punto di vista.



Ripartiamo allora dalle miniere di uranio, che si trovano in numerose nazioni sia interrate, a profondità modesta, sia in superficie:

- 1) L'uranio minerale viene polverizzato in ossido di uranio, poi gassificato in esafluoruro di uranio (UF₆) al fine di facilitare lo spostamento dei due isotopi più diffusi, l'U²³⁸ più pesante e meno interessante come combustibile nucleare e l'U²³⁵ più leggero e interessante come combustibile nucleare;
- 2) Una centrifugazione consente di spostare l'isotopo pesante verso l'esterno e quello leggero verso

¹ Nella LCA ho adottato una massa minore, calcolata analiticamente, mentre nello schema a blocchi avevo utilizzato il rapporto di masse convenzionale reperito in bibliografia.

l'interno, quindi incrementare la concentrazione di quest'ultimo in una parte del gas, quella interna, la cui massa utile è circa un nono di quella iniziale, ma questo risultato può essere ottenuto anche con altri trattamenti;

- 3) I 320 Mg di uranio impoverito, a favore di quello arricchito, sono utilizzabili per numerosi altri processi produttivi;
- 4) L'uranio arricchito viene polverizzato in biossido di uranio (UO₂) e inserito in tubi di zirconio che costituiscono il combustibile nucleare;
- 5) Al termine del suo ciclo di vita come combustibile l'uranio esaurito che viene immerso per un tempo di 3-5 anni in piscine nelle quali smaltisce la maggior parte della radioattività a breve termine;
- 6) Al termine del trattamento, il 95% dell'uranio esaurito viene riprocessato nella forma di esafluoruro di uranio, mentre il restante 5% è costituito per un quarto da Plutonio, utilizzato per produrre un altro combustibile nucleare denominato MOX;
- 7) I tre quarti restanti, corrispondenti a 1,5 Mg, costituiscono la base delle scorie radioattive;
- 8) La parte maggiore di dette scorie, corrispondente al 90%, quindi a 1,35 Mg, è a basso livello di radioattività, e costituisce un rifiuto da smaltire ma non scoria nucleare;
- 9) Restano ancora 150 kg di scorie, ad alto livello (3%, corrispondente a 45 kg) e a medio livello (7%, corrispondente a 105 kg), che costituiscono le vere scorie nucleari.

Forse interessa anche sapere quale volume occupano 150 kg di scorie nucleari: l'uranio ha una massa di 19050 kg/m³, quindi 150 kg occupano un volume di 0,008 m³, cioè 8,0 dm³, quindi un cubo di 20 cm di lato.

Poiché il fabbisogno italiano potrebbe essere coperto da 28 centrali nucleari da 1,6 GW, la copertura con energia nucleare di tutto il fabbisogno elettrico annuale produrrebbe 4,2 Mg, cioè 0,22 m³, di scorie. Un cubo di poco più di 60 cm di lato.

Alle scorie appena calcolate, devono essere aggiunti, come dice il D.Lgs. n. 31 del 2010, i rifiuti ad alta attività quali, per esempio, i tubi di zirconio utilizzati per contenere il combustibile nucleare.

Queste scorie, che io ritengo non possano superare i 1500 kg nella convinzione che la massima potenza nucleare in Italia per i prossimi 10 anni non possa superare i 16 GW per il ragionamento sulla ripartizione dei fabbisogni fatto in precedenza, non sono smaltiti in una "discarica nucleare", contrariamente a quanto si sente affermare con spregio, ma in un vero e proprio impianto di accumulo delle scorie nucleari. Un impianto ingegneristico che oggi, ma non da ieri, si sa benissimo come fare e gestire.

Va precisato però che non inquinano solo le centrali nucleari, ma anche tutte le altre centrali elettriche. Anzi, le altre centrali elettriche inquinano molto più delle centrali nucleari, come evidenzia la seguente matrice dalla quale però suggerisco di recepire solo gli ordini di grandezza, in quanto il discorso relativo agli inquinanti è piuttosto critico.

	Combust.	CO₂	CO	NOx	SOx	PN	ceneri	scorie radioat.	residui
	Mg/a	Gg/a	Mg/a	Gg/a	Mg/a	Mg/a	Gg/a	kg/a	Mg/a
<i>Carbone</i>	32000000	12000	2400	35	96000	2100	500	5	400000
<i>Olio combustibile</i>	15000000	9900	400	16	69000	1600	300	0	112000
<i>Gas (ciclo comb.)</i>	16000000	6700	32	20	60	160	50	0	160
<i>Biomassa</i>	25600000	Σ = 0	540	32	0	1800	400	0	38000
<i>Nucleare</i>	40	0	0	0	0	0	0	150	1,35
<i>Eolico</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Fotovoltaico</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Evito di commentare la matrice, che si commenta da sola. Mi preme solo rilevare, al fine di anticipare una sicura obiezione, come anche le centrali nucleari producano CO₂, non durante il funzionamento caratterizzato da produzione nulla come correttamente ho indicato nella matrice, ma sicuramente durante la fase di estrazione e preparazione del combustibile. È sufficiente uno sguardo disattento alla prima colonna della matrice, però, per capire come la CO₂ prodotta nell'estrazione e movimentazione di 40 Mg (tonnellate) di uranio (prelevabile a profondità modesta quando non in superficie) sia circa un milione di volte minore della CO₂ prodotta nell'estrazione (ormai sempre a maggior profondità) e movimentazione di 32·10⁶ Mg di carbone.

Una ultimissima considerazione sull'analisi del ciclo di vita (Life cycle analysis, o LCA), ai sensi della norma ISO 14040, di cui oggi si parla tanto. Ovviamente mi riferisco alla LCA delle centrali a energia nucleare. Giusto per evitare la contestazione della sua mancanza.

Nell'analisi, riassunta qui di seguito, ho analizzato due alternative, una ottimistica e una pessimistica, al fine di determinare un campo di validità piuttosto che un valore chiuso.

1	Potenza della centrale	1.600	1.600	MW
2	Fattore di carico della centrale	0,90	0,92	
3	Perdite nelle reti	4	5	%
	Energia annua utile	11.983.680,0	12.378.931,2	MWh
4	Costo di costruzione della centrale	4.800,00	6.176,00	M€
5	Durata in attività della centrale	50	60	anni
6	Tempo di costruzione della centrale	5	6	anni
7	Rischio finanziario	3	4	%
8	Premio assicurativo	0	0	€
	Costo di costruzione compreso il finanziamento	14.304,00	19.763,20	M€
	Costo annuo di costruzione per la durata dell'attività	80,00	123,52	M€
	Costo annuo di costruzione compresi il rischio finanziario e l'assicurazione	238,40	395,264	M€
9	Costo di smantellamento della centrale	480,00	617,60	M€
	Accantonamento annuo per lo smantellamento	8,00	12,352	M€
10	Quantità di combustibile annuo (barre di uranio arricchito al 3÷3,5 %)	40	40	Mg
	Quantità corrispondente di uranio minerale allo 0,6÷0,7 %	200	264	Mg
11	Prezzo dell'uranio minerale	45	55	\$/lib
12	Cambio del dollaro	1,480	1,480	\$/€
13	coefficiente moltiplicativo del costo di arricchimento dell'esafluoruro di uranio	2		3
	Costo dell'esafluoruro di uranio arricchito	99	121	\$/kg
	Costo dell'esafluoruro di uranio arricchito	67	82	€/kg
	Costo annuo del combustibile (uranio arricchito)	26.812,527	64.886,315	k€
14	Incidenza sul costo del combustibile del costo di smaltimento delle scorie	25	35	%
	Costo annuo di smaltimento delle scorie	6.703,132	22.710,21	k€
15	Incidenza sul costo annuo di costruzione del costo annuo di manutenzione e gestione	50	60	%
	Costo annuo per la manutenzione e gestione della centrale	38.400,00	46.320,00	k€
16	RISULTATI			
	Costo specifico di costruzione dell'impianto	1,93 ÷ 3,30		c€/kWh
	Costo specifico dello smantellamento della centrale	0,06 ÷ 0,10		c€/kWh
	Costo specifico del combustibile	0,22 ÷ 0,54		c€/kWh
	Costo specifico dello smaltimento delle scorie	0,05 ÷ 0,19		c€/kWh
	Costo specifico di manutenzione	0,31 ÷ 0,39		c€/kWh
	Costo specifico complessivo dell'energia nucleare	2,57 ÷ 4,52		c€/kWh

Si può concludere che l'energia elettrica prodotta da una centrale nucleare costa 2,57÷4,52 c€/kWh. Va bene 4,0 c€/kWh? Credo sia un guadagno notevole rispetto ai 15,1 c€/kWh che oggi noi paghiamo. E anche rispetto ai 9,1 c€/kWh che considera la Francia come costo netto dell'energia elettrica nonostante ne produca quasi l'80% a 5,5÷6,0 c€/kWh (in quanto utilizza centrali abbastanza datate).